

## Математическое моделирование теплообмена и гидродинамики в пластинчатых теплообменниках с гофрированными ребрами

*О.В. Соловьева, С.А. Соловьев, Р.З. Шакурова, А.С. Шубина*

*Казанский государственный энергетический университет*

**Аннотация:** Проведено численное исследование теплообмена и гидродинамики в пластинчатых теплообменниках с гофрированными ребрами. Рассмотрено влияние шага гофры на тепловой поток и перепад давления. Исследование проведено с применением вычислительной гидродинамики в программном комплексе ANSYS (v.19.2). Результаты расчетов показали, что увеличение шага гофры с  $n=5$  до  $n=9$  приводит к повышению теплового потока до 10,83% и перепада давления до 28,30%.

**Ключевые слова:** гидродинамика, численное исследование, расчет, тепловой поток, перепад давления, энергетическая эффективность, система охлаждения

### Введение

В течение последних десятилетий развитие микросхем соответствует известному закону Мура, согласно которому количество транзисторов в микросхеме удваивается каждые 2 года. Кроме того, размеры микросхем уменьшаются, а их энергопотребление и тепловыделение увеличиваются. Как следствие, задача эффективного управления температурным режимом микросхем становится более трудоемкой. Традиционным методом охлаждения является воздушное охлаждение [1]. Однако, ввиду низкой эффективности теплопередачи и проблем с шумом, исследователями проводится поиск альтернативы воздушному охлаждению. Известно о применении тепловых трубок [2], жидкостного охлаждения водой [3] и наножидкостями [4], микроканальных теплообменников с однофазной или двухфазной конструкцией [5] и др. Тем не менее, такие технические решения имеют высокую установочную и эксплуатационную стоимость и не обеспечивают необходимый уровень надежности, что в особенности относится к жидкостному охлаждению. Как следствие, воздушные системы по-прежнему превосходят другие технические решения благодаря низкой стоимости, а также простоте и надежности конструкции. В последние годы

---

развитие получило другое направление исследований – оптимизация геометрии теплообменника системы воздушного охлаждения с целью повышения теплоотдачи. Так, исследователи меняли геометрию ребра теплообменника [6], угол наклона ребер [7], а также применяли перфорирование [8]. Использование гофрированных ребер, как известно, способствует повышению теплоотдачи [9,10]. В данной работе мы провели численное исследование влияния шага гофрированных ребер теплообменника на тепловой поток и перепад давления.

### Постановка задачи и метод решения

Построены 3D-модели теплообменников с гофрированными ребрами (Рисунок 1) с шагом гофры  $n$ : 5, 7 и 9. Высота профиля оставалась фиксированной и равной  $w=3$  мм. Решена задача обтекания потоком воздуха нагретого пластинчатого теплообменника. Исследовано влияние шага гофры на тепловой поток и перепад давления в приближении стационарного потока.

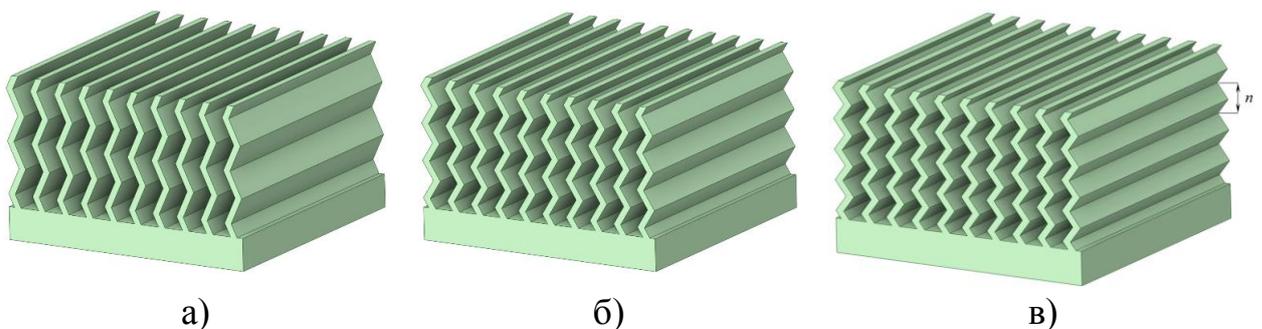


Рис. 1. – Изображения 3D-моделей пластинчатых теплообменников с гофрированными ребрами с шагом гофры: а)  $n=5$ ; б)  $n=7$ ; в)  $n=9$ .

Параметрические расчеты проведены в программном комплексе ANSYS (v.19.2) с применением вычислительной гидродинамики. На входе в расчетную область заданы температура  $T_{\text{возд}}=293$  К и массовый расход воздуха  $G_m$ , который варьировался в диапазоне от  $10^{-3}$  до  $4 \cdot 10^{-3}$  кг/с. К

основанию теплообменника подводилось тепло от нагревателя, имитирующего работу устройства микроэлектроники. Температура нагревателя  $T$  изменялась от 323 до 353 К с шагом 5 К.

### Результаты и обсуждение

По результатам параметрических расчетов построены графики изменения теплового потока (Рисунок 2) и перепада давления (Рисунок 3) в зависимости от расхода воздуха и шага гофры в пластинчатых теплообменниках с гофрированными ребрами.

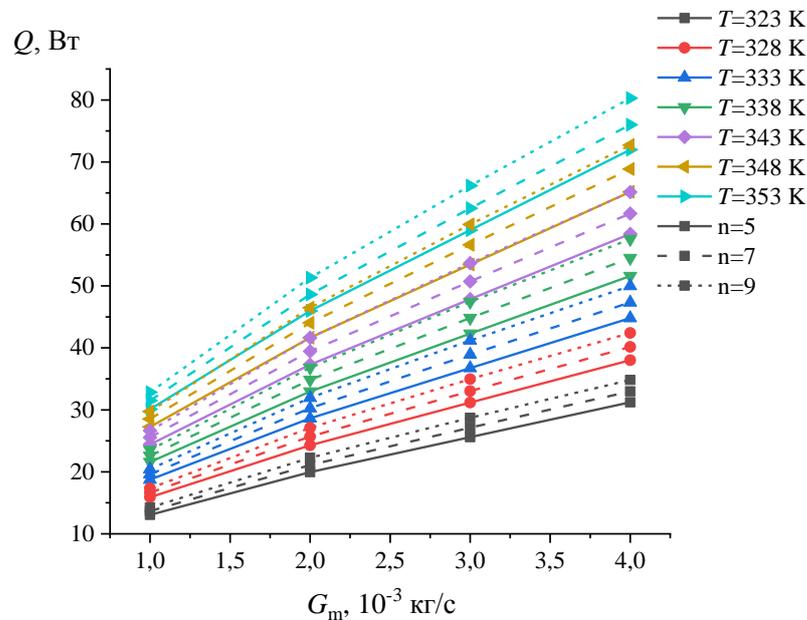


Рис. 2. – Графики изменения теплового потока в зависимости от массового расхода воздуха для теплообменников с различным шагом гофры.

Анализ графиков, представленных на рисунке 2, показал, что увеличение шага гофры приводит к повышению теплового потока. Так, при фиксированном расходе воздуха  $G_m=3 \cdot 10^{-3}$  кг/с и температуре нагревателя  $T=338$  К, тепловой поток составляет:  $Q=42,30$  Вт при  $n=5$ ,  $Q=44,82$  Вт при

$n=7$  и  $Q=47,44$  Вт при  $n=9$ . В этом случае увеличение шага гофры с  $n=5$  до  $n=9$  приводит к повышению теплового потока на 10,83%. С повышением расхода воздуха увеличиваются различия в значениях теплового потока в теплообменниках с разным шагом гофры. Так, при фиксированной температуре нагревателя 353 К, увеличение шага гофры с  $n=5$  до  $n=9$  приводит к повышению теплового потока на 8,34% при  $G_m=10^{-3}$  кг/с и на 10,41% при  $G_m=2 \cdot 10^{-3}$  кг/с.

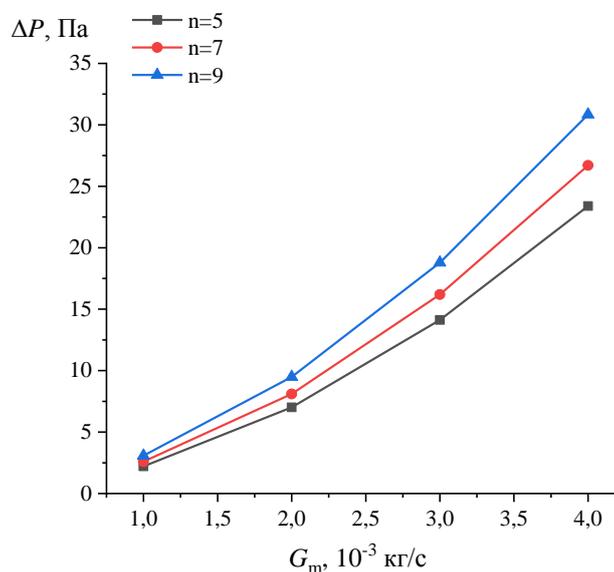


Рис. 3. – Графики изменения перепада давления в зависимости от массового расхода воздуха для теплообменников с различным шагом гофры.

Анализ графиков изменения перепада давления, представленных на рисунке 3, показал, что увеличение шага гофры приводит также и к повышению перепада давления. Так, при фиксированном расходе воздуха  $G_m=3 \cdot 10^{-3}$  кг/с перепад давления составляет:  $\Delta P=14,12$  Па при  $n=5$ ,  $\Delta P=16,19$  Па при  $n=7$  и  $\Delta P=18,79$  Па при  $n=9$ . С повышением расхода воздуха различия в значениях перепада давления снижаются. Так, при увеличении шага гофры с  $n=5$  до  $n=9$  перепад давления повышается на 28,30% при  $G_m=10^{-3}$  кг/с, на

26,05% при  $G_m=2 \cdot 10^{-3}$  кг/с, на 24,85% при  $G_m=3 \cdot 10^{-3}$  кг/с и на 24,15% при  $G_m=4 \cdot 10^{-3}$  кг/с. Высокий перепад давления означает, что для прокачки воздуха через систему охлаждения потребуется вентилятор большой мощности. Следовательно, для обеспечения высокой энергетической эффективности системы целесообразно применять теплообменник, обеспечивающий наименьший перепад давления, в данном случае это теплообменник с шагом гофры  $n=5$ .

### Выводы

Проведено численное исследование характеристик пластинчатых теплообменников с гофрированными ребрами. Проведена оценка влияния шага гофры на тепловой поток и перепад давления. Выявлено, что увеличение шага гофры приводит к повышению как теплового потока, так и перепада давления, при этом максимальный прирост по тепловому потоку составляет 10,83%, по перепаду давления 28,30%, то есть изменение шага гофры оказывает большее влияние на перепад давления, чем на тепловой поток. Результаты исследования позволяют сделать следующий вывод: в приложениях, где необходимо обеспечить высокий тепловой поток для быстрого охлаждения электронного устройства, целесообразно применять теплообменники с шагом гофры  $n=9$ ; в иных случаях, когда важно обеспечить низкое энергопотребление системы охлаждения, целесообразнее применять теплообменники с шагом гофры  $n=5$ .

### Литература

1. Соловьева О.В., Соловьев С.А., Голубев Я.П., Шакурова Р.З. Математическое моделирование процесса осаждения частиц пыли на поверхности пористых теплообменников // Инженерный вестник Дона, 2024, №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2024/9104/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2024/9104/).

---

2. Wang Y., Wang J., He X., Duan J. Experimental investigation of the thermal performance of a heat sink with U-shaped heat pipes // *Applied Thermal Engineering*. 2021. V. 186. P. 116387.

3. Amiri Delouei A., Sajjadi H., Ahmadi G. Ultrasonic vibration technology to improve the thermal performance of CPU water-cooling systems: experimental investigation // *Water*. 2022. V. 14. №. 24. P. 4000.

4. Ghasemi S.E., Ranjbar A.A., Hoseini M.J., Mohsenian S. Design optimization and experimental investigation of CPU heat sink cooled by alumina-water nanofluid // *Journal of Materials Research and Technology*. 2021. V. 15. pp. 2276-2286.

5. Koca F., Güder T.B. Numerical investigation of CPU cooling with micro-pin-fin heat sink in different shapes // *The European Physical Journal Plus*. 2022. V. 137. №. 11. P. 1276.

6. Khudhur D. S., Al-Zuhairy R. C., Kassim M. S. Thermal analysis of heat transfer with different fin geometry through straight plate-fin heat sinks // *International Journal of Thermal Sciences*. 2022. V. 174. pp. 107443.

7. Xie G.F., Zhao,L., Dong Y.Y., Li Y.G., Zhang S.L., Yang C. Hydraulic and thermal performance of microchannel heat sink inserted with pin fins // *Micromachines*. 2021. V. 12. №. 3. P. 245.

8. Gupta D., Saha P., Roy S. Computational analysis of perforation effect on the thermo-hydraulic performance of micro pin-fin heat sink // *International Journal of Thermal Sciences*. 2021. V. 163. P. 106857.

9. Soloveva O., Solovev S., Shakurova R., Mustafaev T. Numerical simulation of dust particle deposition and heat transfer in fin-plate radiators // *International Scientific Conference on Biotechnology and Food Technology (BFT-2023)*. Les Ulis: EDP Sciences, 2023. P. 08006.

10. Soloveva O., Solovev S., Golubev Y., Sabirov N. Study of the influence of fin-plate heat exchanger geometry on dust particle deposition and heat transfer based on numerical calculation // *International Scientific Conference on*

---



Biotechnology and Food Technology (BFT-2023). Les Ulis: EDP Sciences, 2023. P. 07014.

### References

1. Solov`eva O.V., Solov`ev S.A., Golubev Ya.P., Shakurova R.Z. Inzhenernyj vestnik Dona, 2024, №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2024/9104/](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2024/9104/).
2. Wang Y., Wang J., He X., Duan J. Applied Thermal Engineering. 2021. V. 186. pp. 116387.
3. Amiri Delouei A., Sajjadi H., Ahmadi G. Water. 2022. V. 14. №. 24. pp. 4000.
4. Ghasemi S.E., Ranjbar A.A., Hoseini M.J., Mohsenian S. Journal of Materials Research and Technology. 2021. V. 15. pp. 2276-2286.
5. Koca F., Güder T.B. The European Physical Journal Plus. 2022. V. 137. №11. p. 1276.
6. Khudhur D. S., Al-Zuhairy R. C., Kassim M. S. International Journal of Thermal Sciences. 2022. V. 174. p. 107443.
7. Xie G.F., Zhao L., Dong Y.Y., Li Y.G., Zhang S.L., Yang C. Micromachines. 2021. V. 12. №. 3. p. 245.
8. Gupta D., Saha P., Roy S. International Journal of Thermal Sciences. 2021. V. 163. p. 106857.
9. Soloveva O., Solovev S., Shakurova R., Mustafaev T. International Scientific Conference on Biotechnology and Food Technology (BFT-2023). Les Ulis, 2023, p. 08006.
10. Soloveva O., Solovev S., Golubev Y., Sabirov N. International Scientific Conference on Biotechnology and Food Technology (BFT-2023). Les Ulis, 2023, p. 07014.

**Дата поступления: 16.05.2024**

**Дата публикации: 22.06.2024**